

УДК 621.315.6

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.21

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Т. В. КРИТСКАЯ¹, С. В. БЫТКИН^{2}**

¹кафедра электронных систем, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, УКРАИНА

²отдел конъюнктурно-технологического системного анализа ПАО «Запорожсталь», Запорожье, УКРАИНА

*e-mail: krytskaja2017@gmail.com, **bytkin@bigmir.net

АННОТАЦИЯ Технологии высокотемпературных и радиационно-стойких силовых полупроводниковых приборов (СПП) используют структуры на основе SiC, GaN. Мировой рынок дискретных силовых приборов в 2024 г. предположительно составит ~ \$23 млрд., доля приборов на основе кремния $\cong 87\%$. Предложены методы специального легирования монокристаллов CZ-Si и обработки, повышающей механические свойства Si, а также радиационную и термическую стабильность СПП на основе CZ-Si<Ge>.

Ключевые слова: силовой полупроводниковый прибор; гетерозитаксия; кремний; монокристалл; легирование; CZ-Si<Ge>; термостабильность; радиационная стойкость

PERSPECTIVE SEMICONDUCTOR MATERIALS FOR THE USING IN THE POWER ELECTRONICS

T.V. KRITSKAYA¹, S.V. BYTKIN²

¹Department of Electronic Systems, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporozhye, UKRAINE

²Department of Conjunction and Technology System Analysis of PJSC "Zaporizhstal", Zaporozhye, UKRAINE

ABSTRACT The world market of discrete power devices in 2024 will be ~ \$ 23 billion, the share of devices based on silicon will be ~ 87%, due to the price availability and the mastery of silicon technologies. The inflow of investments, the success in mastering SiC, GaN, diamond, heterostructure technologies, and the pressing need for the manufacture of new high-temperature, radiation-resistant power semiconductor devices (PSs) with better performance and frequency characteristics, in comparison with silicon devices, contribute to the growing popularity of these materials from manufacturers of devices. The pressure of legislative and commercial requirements related to energy efficiency and cost reduction contributes to the successful development of a new element base using these materials for the fifth generation (5G) communication networks, broadband Internet access systems, satellite systems, microwave transmitters, civil and military radar stations, for energy and transport. However, the possibilities of silicon in terms of increasing thermostability, radiation resistance, reliability of PSs and industrial development are far from exhaustion. Methods for the special alloying of CZ-Si single crystals and for processing, improving the mechanical properties of single crystals, as well as evidence of an increase in the radiation and thermal stability of silicon-based PSs are proposed.

Keywords: power device; heterostructure; silicon; single crystal; doping; CZ-Si<Ge>; radiation and thermal stability

Введение

Технический уровень преобразовательной техники влияет на состояние энергетики и промышленности в целом. В странах бывшего СССР электроэнергия используется гораздо менее эффективно, что связано с низкой степенью её потребления в преобразованном виде. В США, Канаде, Японии, странах Европы более 60% вырабатываемой электроэнергии проходит через полупроводниковые преобразователи. Применение силовых полупроводниковых приборов (СПП) и преобразовательной техники в самых разных секторах экономики и социальной сферы снижает потери энергии и позволяет внедрять надежные энергоэффективные технологии для всего технологического цикла электроэнергетики: выработка, передача, распределение и потребление электрической энергии [1]. По мнению аналитиков IMS Research [1, 2],

мировой рынок дискретных силовых приборов в 2024 г. составит ~ \$23 млрд. (в 2017 г. – \$ 15 млрд.). Доля кремниевых приборов прогнозируется равной ~ 87%. Это определяется ценовыми преимуществами, освоенностью технологий кремния и его сырьевой доступностью. Остальная часть рынка предполагается быть занятой приборами на основе SiC и GaN (табл. 1, 2). С 1990-х годов бурно развиваются направления «интеллектуальных» СПП (IGBT, MOSFET, FET, SIT, HEXFET) и силовых интегральных схем (SMART POWER IC). В настоящее время и в будущем интеллектуальным силовым компонентам в силовой электронике альтернативы не предвидится. Основными приборами силовой электроники в области коммутируемых токов до 50А являются:

- диоды (Diodes);
- тиристоры (Thyristors, SCR);
- биполярные транзисторы (BPT);
- биполярные транзисторы с изолированным

затвором (IGBT);
- полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET);
- силовые интегральные схемы (Power IC);
- интеллектуальные силовые интегральные схемы (Smart Power IC).

В области коммутируемых токов более 50 А широко используются силовые модули на базе биполярных транзисторов, IGBT, тиристоры, запираемые тиристоры (GTO, IGCT), диоды. Силовые интегральные монолитные и гибридные схемы используются в современных преобразователях малой и средней мощности (1...30 кВт) в одном кристалле, либо в одном корпусе с силовым прибором в схемах управления, защиты и диагностики. Это позволяет резко уменьшить габариты и стоимость, а также увеличить надежность преобразователей.

Таблица 1 – Типы и подклассы силовых полупроводниковых приборов, которые будут востребованы на мировом рынке к 2020 г. [3]

| Прибор | Si | GaAs | SiC | Ga N |
|--------------------------------------------------------------|----|------|-----|------|
| Диод с барьером Шоттки | + | + | + | + |
| Диффузионные UFRED (p-i-n) | + | + | + | + |
| MOSFET | + | -* | + | + |
| IGBT | + | - | + | + |
| IFET | + | + | + | + |
| Динисторы, управляемые тиристоры, фототиристоры | + | + | + | + |
| МСТ/ЕТО | + | + | + | + |
| Гипербыстрые диоды (Hyperfast FRED) | - | + | - | + |
| VJT | + | + | + | + |
| Сверхвысоковольтные VJT | + | - | + | + |
| HEMT (высоковольтные >200 В) | - | + | - | + |
| IGCT (сверхмощные) | + | - | + | - |
| Сверхвысоковольтные мощные СВЧ-транзисторы(>500 В, >1,0 ГГц) | - | + | - | + |
| ВНТ | - | + | - | + |
| Н-тиристоры, в т. ч. GTO | - | + | - | - |
| Н-СИТ-тиристоры | - | + | - | - |
| Н-фототиристоры | - | + | - | - |
| Мощные драйверы и контроллеры для ВЧ-переключения | + | + | - | + |

Таблица 2 – Рынок силовой электроники по используемым материалам [3]

| Материал | 2010 г., млн \$ (%) | 2014 г., млрд \$ (%) | 2020 г., млрд \$ (%) |
|----------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Si | $\geq 29,6 \cdot 10^3$ (99,68) | 30 (97,9) | 33,0 (92) |
| SiC | $\geq 52...56$ (0,2) | 0,3 (1,0) | 1,8 (5) |
| GaAs | ≥ 25 (0,1) | 0,15 (0,5) | 2,0 (5,5) |
| GaN | $\geq 0,1$ (0) | $\sim 0,02$ (0,06) | 0,3 (0,84) |
| Алмаз | | | 0,01 (< 3·10 ⁴) |

Принципиальное значение имеет применение в схемах силовых приборов ИС с полевым управлением, поскольку они значительно проще сопрягаются с цифровыми системами управления и имеют малые коммутационные потери. Широкое распространение MOSFET (инверторы, импульсные регуляторы тока, частотно-регулируемые приводы и др.) и др.) обусловлено их малыми статическими и динамическими потерями, незначительными затратами на управление, крайне небольшими временами переключения вплоть до частот 1 МГц. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors) в настоящее время обеспечивают коммутацию токов до 3600 А и напряжений до 6,5 кВ. Применение IGBT-модулей в системах управления тяговыми двигателями позволяет (по сравнению с тиристорными устройствами) обеспечить высокий КПД, плавность хода машины, возможность применения рекуперативного торможения практически на любой скорости, работать при достаточно высоких температурах (более 100°C). IGBT и MOSFET занимают диапазон средних мощностей и частот, частично «перекрывая друг друга». В общем случае, для высокочастотных низковольтных каскадов наиболее подходят MOSFET, а для высоковольтных мощных – IGBT.

Анализ состояния вопроса

Современные дискретные высоковольтные диоды, транзисторы, тиристоры изготавливаются на пластинах кремния с высоким удельным сопротивлением (УЭС) при использовании традиционных процессов глубокой диффузии, окисления, ионного легирования. Чем выше пробивное напряжение, тем более высокоомный кремний должен использоваться. Активная часть мощных высоковольтных МДП-транзисторов, тиристоров, IGBT-приборов формируется в слое высокоомного кремния (УЭС для $U_{проб.} > 100В$ – более 20 Ом·см). Активный высокоомный рабочий слой должен иметь разброс толщины и УЭС не более $\pm 5\%$, плотность микродефектов $\leq 10^4$ см⁻²,

концентрации кислорода и углерода соответственно $N_0 < 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $< 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Используемая подложка (обычно глубоко легированный кремний, например, CZ-Si<Sb>с УЭС $\leq 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) не должна содержать примесей бора во избежание образования паразитного р-п-перехода на границе высокоомного рабочего слоя и низкоомной подложки. Соблюсти эти требования достаточно сложно. Поэтому вполне логичным стало использование прямого соединения двух кремниевых пластин, так называемый DBP-процесс (direct-bonding-process), когда взамен наращиваемого высокоомного рабочего слоя используется пластина нейтронно-легированного кремния, выращенного методом бестигельной зоной плавки (FZ-Si) или методом Чохральского в магнитном поле (CZM-Si) [4]. Такой процесс экономически эффективен, поскольку при наращивании высокоомных эпитаксиальных слоёв большой толщины (80-130 мкм) происходит размытие фронта диффузии (из-за разброса толщины эпи-слоя и высокой плотности дефектов в слое), а также автолегирование эпи-слоя фоновыми примесями из CZ-Si<Sb>-подложки. Использование в качестве рабочей области пластины из монокристалла НТЛ FZ-Si обеспечивает стабильную толщину, высокое структурное совершенство высокоомной области, термостабильность, малый разброс ($\leq 5\%$) и четкое совпадение её УЭС с расчетными значениями. Также за счет соединения пластин возможно формирование р-п-переходов большой площади, кремниевых структур на изоляторе (через слой диэлектрика). DBP-процесс в настоящее время используется при промышленном получении мощных интегральных схем SmartPowerIC, элементной базы для цветных дисплеев, высоковольтных операционных усилителей, оборудования средств связи.

Мировые интеллектуальные ресурсы в настоящее время брошены на разработку гетероструктур на основе широкозонных полупроводников - от 1,38 эВ (InP) до 2,2-3,3 эВ (SiC, GaN), и выше – алмаз (5,47 эВ), AlN (6,2 эВ), BN (~5 эВ) и др. Вполне закономерный интерес к широкозонным полупроводниковым материалам – GaAs и его твердые растворы, SiC, GaN, алмаз. Он вызван возможностью создания на их основе новых высокотемпературных радиационно стойких силовых биполярных и униполярных приборов, имеющих лучшее быстродействие и частотные характеристики в сравнение с кремниевыми приборами. Перспективы использования более широкозонных, по сравнению с Si, материалов для промышленной силовой полупроводниковой электроники связаны, в основном, с возможностью расширения рабочего диапазона плотностей тока (увеличение в 2-3 раза). Например, пробивные напряжения для резких р-п переходов в $\text{GaAs}_{0,65}\text{P}_{0,35}$ в 10-20 раз выше, чем для р-п переходов в кремнии при той же концентрации носителей заряда. Возможно увеличение допустимой рабочей температуры р-п переходов, которая при

прочих равных условиях зависит от ширины запрещенной зоны используемого полупроводника. Прямозонная структура GaAs позволяет на двойных гетероструктурах GaAs-AlGaAs создать диоды со сверхвысокими плотностями тока, благодаря возможности вывода потерь в окружающее пространство в виде когерентного рекомбинационного излучения. Также зонная структура "прямого" полупроводника в соединениях GaAs-AlGaAs позволяет в двойных гетероструктурах создать диоды на сверхвысокие плотности тока благодаря возможности вывода потерь в окружающее пространство в виде когерентного рекомбинационного излучения. В настоящее время для создания подложек на GaAs с заданными характеристиками в большинстве случаев используется технология газовой эпитаксии с применением металлорганических соединений, что существенно сложнее, по сравнению с технологиями монокристаллов и эпитаксиальных слоёв кремния. Тем не менее, преимущества базовой р-и-n- GaAs-технологии (AlGaAs/GaAs) обеспечивают дальнейший прогресс по ряду направлений:

- IGBT – на 600, 1200, 1700 В, на частоты 3,0-1,0 МГц;
- Мощные MOSFET-на 250-1700 В; 1-20 МГц;
- Мощные JFET-от 250 до 1200 В, 10-100 МГц;
- Мощные тиристоры (в том числе ЕТО, МСТ) - 600-1700 В; от 0,3 до 2 МГц;
- СВЧ-транзисторы, диоды – 1-12 ГГц, 100-1000 В;
- Лазерные силовые ключи – единицы пикосекунд. 1000 В десятки ампер [5].

Компонентная база на основе GaN-гетероструктур, сформированных над структурами из узкозонных полупроводниковых материалов, привела к технологическому прорыву в изготовлении транзисторов для использования в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Высокая удельная мощность СВЧ-транзисторов на основе GaN, улучшенные линейные характеристики позволяют повысить эффективность усилителей мощности, уменьшить их массу и габариты, упростить топологию монолитных интегральных схем, облегчить их промышленный выпуск. Развитие этих технологий определит возможность использования изделий на нитриде галлия в сетях сотовой связи пятого поколения (5G), системах широкополосного доступа в интернет, спутниковых системах, в передающих СВЧ-устройствах, РЛС гражданского и военного назначения.

Однако быстрой коммерциализации GaN-технологии препятствовало отсутствие качественных подложек для эпитаксиального наращивания GaN. Использование подложек из Si (пластины диаметром 150-300 мм) было бы оптимальным, поскольку при их относительно невысокой стоимости было бы возможным осуществлять промышленный выпуск приборов на имеющемся технологическом оборудовании при сохранении существующей

инфраструктуры производственных линий. В то же время, при получении структур, несоответствие параметров кристаллических решеток используемой подложки и плёнки не должно превышать 0,1 %, а у кремния и GaN несоответствие превышает 14%. Кроме этого, коэффициент термического расширения GaN превышает кремниевый и при охлаждении от температуры эпитаксии (~1000°C) до комнатной происходит деформация и искривление гетероструктуры вплоть до её растрескивания. В настоящее время проблема практически решена в связи с нахождением технологий нанесения на кремний буферных промежуточных слоёв (AlN, AlGaIn, Ti-Al-Ni-Au) [6-8] перед GaN. Это позволило ускорить разработки новых семейств высоковольтных приборов для силовой электроники (пробивные напряжения до 1200-1600 В), новых приложений СВЧ-энергетики, автомобильной автоматики и радиационно-стойкой элементной базы [8]. Использование гетероструктур Si/GaN в силовой электронике обеспечило разработку конверторов с высокой подвижностью электронов (HEMT), преобразователей питания по LLC-схеме в токовом режиме [9]. Силовые устройства на основе GaN с обратным напряжением 150 В обладают в два раза меньшим комплексным показателем потерь (FOM) по сравнению с таким же устройством на основе кремниевой технологии. Это обстоятельство позволяет разрабатывать более эффективные источники питания с наименьшими габаритами для широкого спектра электроники. Объем рынка подложек GaN-на-Si к 2019 г. превысит 300 млн. долл. [10].

Дальнейшее повышение радиационной и термической стойкости обеспечит появление в 2018 г. гетероструктур GaN/SiC-транзисторов с шириной затвора 40 нм, плотностью мощности 800 мВт/мм и частотным диапазоном 210 ГГц [6]. Совершенствование технологии получения монокристаллов и эпитаксиальных слоёв карбида кремния (рост диаметра от 76 мм до 150 и даже 200 мм) привело к росту объёмов их выпуска и снижению стоимости. Этому способствовала разработка установки baSiC-T, (компания PVA TePla, Германия) промышленного получения монокристаллов SiC по методу CVD (Chemical Vapor Deposition). Более 100 фирм-производителей силовой электроники в мире уже потребляют этот материал. Ведущие игроки – компании Infineon, Mitsubishi Electric и Fuji [11].

Инверторы для солнечных панелей и повышающие преобразователи уже давно используют преимущества, которые дает технология SiC MOSFET. В том же направлении следуют источники бесперебойного питания (UPS) и зарядные устройства. Такие устройства силовой электроники, как приводы электродвигателей и автомобильные приложения, которые в настоящее время ориентированы на кремниевые элементы, неизбежно

ожидает масштабное внедрение новых материалов [11]. Сейчас Infineon предлагает пятое поколение SiC-диодов и в ближайшем будущем готовит к выпуску первые широкозонные SiC MOSFET. Огромный опыт Infineon, накопленный при производстве кремниевых устройств, позволяет компании предлагать клиентам широкий спектр оптимизированных силовых компонентов – от кремниевых и гибридных устройств до специализированных решений с большой шириной запрещенной зоны.

Интенсивные разработки уже позволили начать промышленное производство SiC-диодов Шоттки на токи до 25 А и напряжения до 1200 В, экспериментально отработать конструкции и технологии производства сверхвысоковольтных диодов, высоковольтных полевых транзисторов (с изолированным затвором SiCMOSFET и управляемых р-п-переходом SiC-JFET), каскадных SiC-Si ключей. В ближайшие годы следует ожидать появления следующих типов SiC-приборов силовой электроники:

- быстродействующие диоды (Шоттки) с блокирующим напряжением 4,9 кВ;
- MOSFET с коммутируемыми напряжениями более 1000 В и сопротивлением в открытом состоянии, на три порядка меньшим по сравнению с MOSFET на базе Si;
- JFET (полевой транзистор, управляемый р-п-переходом) с блокирующими напряжениями 3,5 кВ с удельным сопротивлением в открытом состоянии 25 мОм см² (как у 600 В CoolMOS), что соответствует плотностям коммутируемых токов 100 А/см² и прямым падениям напряжения около 2,5 В (для 3300 В приборов);
- каскадных SiC-Si приборов;
- высоковольтных быстродействующих биполярных силовых приборов
- диодов, транзисторов, тиристоров с коммутируемыми напряжениями более 10 кВ (19 кВ!) и частотами коммутации несколько кГц.

CVD-процесс получения монокристаллов SiC значительно сложнее, чем традиционные технологии кремния и германия - труднорегулируемый процесс образования парообразной фазы за счет возгонки порошка SiC при 2200°C, сложная подготовка подложек, проблема устранения микропор (micropores) в объёмных монокристаллах и эпитаксиальных слоях. Однако сочетание ряда уникальных свойств SiC: работа при высоких (до 600-700°C) температурах, ширина запрещенной зоны 2,4-3,3 эВ, (для Si — 1,12 эВ); высокая теплопроводность - 3-5 Вт/см град (1,5 Вт/см град для Si), большие плотности рабочих токов (1000 А/см²), высокая подвижность электронов, большая, чем у кремния (на порядок) критическая напряжённость электрического поля (3-5·10⁶ В/см для SiC, с 2-5·10⁵ В/см для Si) позволяют, в принципе, улучшить все характеристики приборов силовой электроники: быстродействие, предельные коммутируемые токи и напряжения,

статические и динамические потери. Высокие объёмы инвестиций в технологии SiC и растущие потребности в материале обеспечивают разработку многих вариантов получения SiC. В частности, гетероструктуры $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x/\text{SiC}/\text{Si}$ на пластине кремния создают нанесением на её поверхность магнетронным методом нанослой SiC, что позволяет уменьшить механические напряжения на границе подложка-нанослой и получать монокристаллические слои твёрдых растворов $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$ с необходимыми толщинами и уровнями легирования. Разработка конструкторско-технологических решений для реализации компонентной базы силовой-, оптоэлектроники и микросистемной техники на основе композиций AlN и SiC позволит перейти к созданию инверторов, преобразователей с высокими скоростями переключения для солнечных и ветрогенераторных станций, приводов электродвигателей, источников бесперебойного питания, приложений для бытовой электроники, автомобилестроения, изделий для информационных технологий. Подобная электроника представляет важный сдвиг парадигмы освоения космоса и позволит состояться миссиям, которые ранее были невозможны. Электроника на SiC позволит исследовать поверхность и недра Венеры, Юпитера, Сатурна, Урана, давление и температура которых были недоступны для изучения, использовать зонды для проникновения в недра планет для получения данных об их атмосферах и магнитных полях [12, 13].

Несмотря на доминирование кремниевой индустрии, мировые исследовательские центры активно экспериментируют с альтернативными материалами, одним из которых является алмаз. Актуальной и острой проблемой использования кремния является его нагрев, и управление тепловыми режимами кремниевых СПП всегда являлось большой проблемой электроники. Используемые методы охлаждения приводят к существенным энергетическим потерям и в ряде случаев малоэффективны. При комнатной температуре алмаз обладает рекордной теплопроводностью 20 Вт/см·К, что в три раза больше, чем у золота, а изотопно чистый алмаз, состоящий только из изотопа ^{12}C , - 33 Вт/см·К [14]. Применения алмаза постоянно расширяются, причём как в качестве подложки для кремниевых структур, так и для других полупроводниковых материалов. Высокое УЭС алмаза, более 10^8 Ом·см, делают его чрезвычайно перспективным для формирования на нём гетероструктур GaN и AlN. В этом направлении проводятся интенсивные исследования. Одним из перспективных направлений использования алмаза, как активного элемента, является сильноточная и высоковольтная электроника, где будет возможным значительно сократить энергозатраты. Использование алмазных полупроводников увеличит сроки службы аккумуляторных систем для широкого спектра устройств, включая телефоны, фотоаппараты и

транспортные средства. Неоценимы возможности новых материалов в области производства компьютерных серверов, использующихся в центрах обработки данных, которые потребляют огромное количество энергии чрезвычайно расточительным образом. Широкие возможности раскрываются для производителей бытовой электроники, военной и космической техники, где необходимы высокая надёжность для любых экстремальных режимов эксплуатации и промышленные объёмы выпуска. Некоторые устройства, невозможные раньше, будут только еще изобретены [15].

Разработанная технология получения монокристаллов алмазов и его поликристаллических плёнок также использует метод химического осаждения из газовой фазы (CVD), позволяющий преобразовать углерод в плазму, которая затем осаждается на подложку в виде алмаза. В настоящее время получены чистые алмазные плёнки и пластины диаметром более 100 мм и толщиной от единиц мкм до 1-3 мм. Метод CVD обеспечивает высокую воспроизводимость электрофизических параметров, выращивание на профилированных подложках из различных материалов, а также отсутствие пор.

К недостаткам алмазных технологий относятся [14]:

- опасность графитизации при температуре выше 600°C в присутствии кислорода и превращение алмаза в графит при 900°C ;
- трудности механической обработки (шлифовки, полировки), формирования областей p- и n-типа, диффузии, ионного легирования, «сухого» и «мокрого» травления, поскольку алмаз самый твердый и химически стойкий материал;
- сложность контролируемого направленного легирования примесями p- и n-типа, которые уже при комнатной температуре полностью активизированы. Большинство исследованных примесей алмаза имеют очень глубокие примесные энергетические уровни, не позволяющие создавать приборы, стабильно работающие при обычных температурах.

До массового производства приборов на синтетическом алмазе предстоит ещё решить комплекс научных и технологических проблем. Вместе с тем, на природных и синтетических монокристаллах алмаза уже удалось создать СВЧ-транзисторы, диоды Шоттки, не чувствительные к солнечному свету фотоприемники, датчики рентгеновского излучения и т.п. Начало коммерческого выпуска приборов на этих материалах показывает, что главные технологические проблемы уже решены [16].

Несмотря на имеющиеся прогнозы, что к 2030-2035 гг. монопольность кремниевой электроники (монополупроводниковой) исчезнет навсегда [17-20], объёмы использования кремния в течение ещё многих лет не снизятся ниже 90% и отказываться от него промышленность СПП не намерена. Это связано с неисчерпаемостью сырьевых запасов SiO_2 ,

освоенностью кремниевых технологий, большими объёмами и дешёвой промышленно получаемых монокристаллов кремния, их структурным совершенством (бездислокационная структура, макро- и микрооднородность распределения примесей), а также имеющимися перспективами полупроводниковой чистоты: отказ от карбо-термического восстановления кварцитов, энергосберегающие высокоэффективные методы очистки технологических продуктов от фоновых примесей, новые методы легирования и управления качественными параметрами монокристаллов и др. Поэтому использование кремния в технологии СПП будет по-прежнему ориентировано как на объёмные свойства монокристаллов, напущенных эпитаксиальных слоёв, так и на специальную подготовку подложек для изготовления гетероэпитаксиальных структур.

Цель работы

Целью работы является анализ существующих подходов к использованию полупроводниковых материалов для изготовления СПП, а также особенности применения монокристаллов кремния с комплексом новых свойств, производимых отечественной промышленностью.

Изложение основного материала

Несмотря на то, что в настоящее время рынок силовой электроники заполнен импортной продукцией (годовой объём импорта составляет ~ 1 млрд. долл., что намного превышает собственное производство [21]), существуют и отечественные аналоги СПП и модулей. Они, как правило, применяются там, где запрещено использование импортной элементной базы (например, электроника для ВПК). Рынок силовых ПП в странах постсоветского пространства очень велик и может составить по некоторым оценкам до \$200 млрд. в год.

Для выпуска конкурентоспособных приборов силовой электроники не так критичен диаметр используемого монокристалла, а топологические размеры элементов (0,25...0,35 мкм) еще далеки от субмикронных норм микроэлектроники. Обеспечить бесперебойную работу отрасли могут предприятия, оснащенные оборудованием для технологической обработки монокристаллов диаметром 40...150 мм, комплекс которого в настоящее время имеется на постсоветском пространстве. К сожалению, отечественные производители изделий силовой электроники пока не приобрели широкой известности. Тем не менее, они успешно работают на рынке, постепенно завоевывая популярность у потребителей. Параметры СПП, выпускаемых отечественными производителями, близки к зарубежным аналогам, однако стоимость их ниже. В частности, стоимость закупаемых в настоящее время

Украиной силовых тиристоров составляет ~ \$ 1000 за один кА, стоимость импортируемых монокристаллов FZ-Si для производства собственных приборов ~ 400...450, а нейтронно-легированных FZ - Si - \$ 1000...1100 кг.

В зависимости от рыночной конъюнктуры, при производстве СПП могут использоваться монокристаллы кремния, полученные как по методу Чохральского (CZ), так и бестигельной зонной плавкой (в том числе, и нейтронно-легированный кремний). Для изготовления мощных высоковольтных приборов предпочтительнее использование монокристаллов кремния диаметром 76...150 мм с повышенной однородностью, получаемых методом бестигельной зонной плавки (FZ), а также монокристаллов FZ-Si, подвергнутых нейтронному трансмутационному легированию (neutron transmutation doped silicon). Для создания биполярных и полевых транзисторов используются эпитаксиальные структуры, где подложкой является низкоомный кремний диаметром 76...150 мм, получаемый методом Чохральского. Основные требования к материалу подложки – низкое содержание остаточных и фоновых примесей, а также ростовых дефектов структуры. Их наличие приводит к образованию дефектов в эпитаксиальном слое и может явиться причиной возникновения «паразитных» р-п-переходов на границе подложка - эпитаксиальный слой («фантом-эффект»). Технологии совершенствования новых поколений СПП (в основном, для классов MOSFET и IGBT) [21, 22] предусматривают переход к использованию тонких пластин (thin wafer technology), что потребует использования монокристаллов FZ-Si с повышенными механическими свойствами (недопущение высокого уровня брака при механической обработке). В настоящее время для приборов силовой электроники до 1200 В уже применяются кремниевые пластины диаметром 150 мм (включая и эпитаксиальные структуры) толщиной 100 мкм. Имеется тенденция к снижению толщины 150-мм пластин до 60 мкм, и к 2020 г. использование пластин диаметром 200 мм с такими толщинами;

Монокристаллы кремния для использования в качестве подложек для эпитаксиальных слоёв.

Наиболее распространены кремниевые $n-p^+$ - структуры, у которых концентрация легирующего элемента в эпитаксиальном слое на несколько порядков ниже, чем в подложке. В качестве материала подложки используются бездислокационные монокристаллы кремния, легированные до высоких концентраций элементами V группы. При этом предпочтительна легирующая добавка сурьмы, которая, обладая невысоким коэффициентом диффузии в кремнии, не загрязняет растущий эпитаксиальный слой и позволяет получать высокоомные слои достаточно большой толщины. Помимо структурного совершенства и однородности распределения легирующего элемента по объёму и

сечению монокристалла CZ-Si<Sb>, к числу главных требований к качеству материала подложки относится низкое содержание фоновых примесей. Примесь углерода в материале подложки Si<Sb> может приводить к образованию дефектов структуры в эпитаксиальном слое [23, 24]. Присутствие фоновых электрически активных примесей приводит к существенному искажению характеристик переходной области вблизи границы эпитаксиальный слой-подложка. При этом фоновые примеси, дающие донорный уровень, но имеющие более высокие коэффициенты диффузии, чем легирующая Sb, могут вызвать существенное уширение переходной области [25], а фоновые акцепторные примеси (B, Al и др.) приводят к образованию прослоек дырочного типа и паразитных *p-n*-переходов [26]. Образование высокоомных прослоек («фантом-эффект») является причиной резкого снижения выхода годных изделий, во многом осложняет производство, приводит к его удорожанию, в частности, при производстве MOSFET. Аналитически [26] установлена критическая концентрация фоновых акцепторных примесей в подложке ($1 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) в зависимости от соотношения коэффициентов диффузии доноров и акцепторов подложки и уровня легирования эпитаксиального слоя, при которых возможно образование прослоек дырочного типа.

Как нами было экспериментально установлено (выращивание специально легированных монокристаллов, контроль содержания примесей методом ВИМС с использованием масс-спектрометра «Самеса IMS 4F»), наиболее вероятной причиной «фантом-эффекта» является образование комплексов Sb-C [27]. Это позволило решить проблему подготовки шихты для выращивания монокристаллов CZ-Si<Sb> (ограничение содержания собственных оборотов CZ-Si<Sb> в загрузке) и получить надёжный метод оценки пригодности материала подложки к использованию в процессе эпитаксии. В качестве иных путей к решению проблемы «фантом-эффекта» может быть использовано введение в расплав кремния с содержанием сурьмы 0,3-1,4 % масс модифицирующей примеси германия в количестве 0,08-1,8 % к массе кремния [26].

Нейтронно-легированный (НТЛ) кремний.

НТЛ кремний с минимальным разбросом УЭС, высоким временем жизни неравновесных носителей заряда ($\tau_{\text{ннз}}$) широко используется в мировой практике для создания многих классов приборов: тиристоры, приборы с зарядовой связью, СБИС, детекторы излучений, фотоприёмники. С развитием солнечной и ветроэнергетики резко возросла потребность в преобразователях вырабатываемого постоянного тока и передачи его в глобальную электрическую сеть. Помимо возобновляемой энергетики, линий электропередач постоянного тока ультравысокого напряжения, основными потребителем такой продукции являются силовые приводы (электродвигатели) с высоким КПД, программным

управлением для электровозов, электромобилей, мощных станков. Главная роль в элементной базе инверторов принадлежит силовым ключам – IGBT транзисторам и IGSTтиристорам. Все полупроводниковые ключи с рабочими напряжениями выше 1600 вольт также изготавливаются из НТЛ кремния. Объёмы его выпуска в мире составляют 200-250 т в год, а объём рынка превышает ~ \$ 150 млн, и это один из самых больших мировых рынков изотопной продукции [29]. Значительная роль в разработке промышленных методов получения исходных монокристаллов для НТЛ и режимов легирования принадлежит Украине. Однако проблема получения и использования НТЛ кремния требует дальнейших исследований. Нами было установлено [27], что выращенные бездислокационные монокристаллы FZ-Si с величиной УЭС от единиц до нескольких тысяч Ом·см в результате хранения при комнатной температуре могут в разной степени изменять свои электрофизические параметры. Если у монокристаллов FZ-Si и FZ-Si<P> с величинами УЭС от 1 до ~1000 Ом·см параметры УЭС и $\tau_{\text{ннз}}$ практически не изменялись в результате 7-15 лет хранения, то для монокристаллов FZ-Si диаметром 80...105 мм с величиной УЭС 3...5 кОм·см отмечено увеличение УЭС и снижение $\tau_{\text{ннз}}$ более, чем на 20 %. После нейтронного легирования на номинал УЭС 20...90 Ом·см и длительности хранения до 10 лет монокристаллы FZ-Si диаметром 80...105 мм практически не изменяли своих характеристик. Легированные нейтронной трансмутацией монокристаллы на номинал УЭС 100...300 Ом·см, хранившиеся в течение 10 лет, обнаруживали снижение УЭС и $\tau_{\text{ннз}}$ от исходных значений. Отмечалось также увеличение неоднородности этих параметров по поперечному сечению монокристаллов. В меньшей степени деградации параметров были подвержены монокристаллы FZ-Si и FZ-Si<P> диаметром 25...40 мм с величиной УЭС более 10 кОм·см. После хранения в течение 10...12 лет в УЭС практически не менялось (типичное снижение 3-5 %), а $\tau_{\text{ннз}}$ в некоторых случаях снижалось от величин 1000...1300 до 800...900 мкс. После термообработки (700°C, 20 мин) УЭС обычно восстанавливалось, однако $\tau_{\text{ннз}}$ не возросло.

Наибольшая деградация электрофизических параметров наблюдалась для CZ-монокристаллов, подвергнутых НТЛ. В качестве исходных были использованы монокристаллы CZ-Si<P> диаметром 100 мм с величиной УЭС после выращивания ~100 Ом·см. НТЛ легирование производилось на номинал 4,5 Ом·см. После НТЛ были достигнуты весьма низкие объёмная и радиальная неоднородности УЭС – соответственно 2 и 1%. После 15 лет хранения произошла инверсия типа электропроводности, УЭС составило ~16 кОм·см, а величина $\tau_{\text{ннз}}$ изменилась от 10...15 мкс до величины, меньшей предела чувствительности метода измерения.

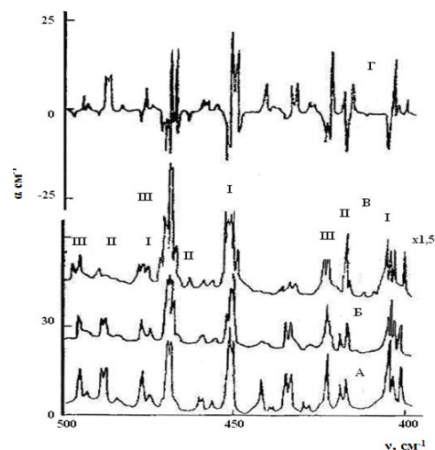
Результаты проведенных нами исследований показали, что процессы деградации FZ-Si и CZ-Si связаны с трансформацией твердого раствора кислорода в кремнии (концентрация кислорода в FZ-монокристаллах может достигать величины $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). В случае НТЛ FZ-монокристаллов нельзя исключить возможного образования радиационных дефектов, связанных с водородом в кремнии [30, 31], наличие которого всегда прослеживается в монокристаллах кремния, в том числе и подвергнутых глубокой очистке. Ярко выраженная деградация параметров НТЛ CZ-монокристаллов может быть связана с повышением рекомбинационной активности ростовых микродефектов и кислородных преципитатов вследствие взаимодействия с радиационными дефектами [30-32], которое, по-видимому, происходит и при комнатной температуре. Это свидетельствует, несмотря на кажущиеся экономические преимущества, о невозможности использования подвергнутых НТЛ монокристаллов CZ-Si для изготовления СПП и других изделий электроники.

Монокристаллы кремния для СПП, выращенные по методу Чохральского.

Для дискретных приборов средних классов (токи до 80 А, обратные пробивные напряжения – менее 2 кВ) используются монокристаллы как FZ, так и CZ, диаметром 76...150 мм (в странах бывшего СССР – 40...80 мм) и величиной УЭС 40-80 Ом·см. Поскольку монокристаллы CZ-Si имеют существенно большую концентрацию кислорода (в 5-10 раз превышающую величины в FZ-Si) необходимы специфические подходы к расчету толщины базовых областей, режимам процессов диффузии и охлаждения. При использовании монокристаллов CZ-Si важно не допустить образования крупных преципитатов кислорода и окислительных дефектов упаковки на стадиях изготовления прибора, так как это приводит к увеличению токов утечки и повышает вероятность пробоя структуры. Тем не менее, промышленное использование монокристаллов CZ-Si имело определённые преимущества: высокий выход пластин после операций резки и механической обработки (примесь кислорода делает монокристалл более пластичным, обеспечивая сток внутренних упругих напряжений), высокий выход приборов с величиной обратного пробивного напряжения более 1600 В, существенно меньшая стоимость (по сравнению с FZ-Si примерно в 5 раз). Причиной высокого выхода высоковольтных приборов являлось то обстоятельство, что при расчёте параметров конструкции прибора (по величине измеренного УЭС) не принималось во внимание присутствие в монокристалле ростовых термодоноров, что при измеренной величине УЭС $\sim 45 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ соответствовало концентрации фосфора $\sim 4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ вместо $\sim 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, используемой при расчетах. При этом парадоксальная ситуация, когда величины УЭС по верхнему и нижнему торцам монокристалла

были практически одинаковыми, утраивала производителей и монокристаллов и СПП.

Существенно уменьшить концентрацию ростовых термодоноров позволяет легирование расплава в процессе выращивания монокристаллов CZ-Si германием (рис. 1). При этом концентрация ростовых термодоноров (ТД-1, генерируемых при $\sim 450^\circ\text{C}$) подавляется и существенно снижается рост концентраций других центров с ростом концентрации германия ($N_{\text{Ge}} > 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) [33].



$N_{\text{Ge}}, \text{см}^{-3}$: А-0; Б- $3 \cdot 10^{18}$; В- $2,6 \cdot 10^{19}$; Г - разность спектров А и В

Рис. 1 – Спектры поглощения (ТД-І)° в Si и Si<Ge>

Монокристаллы кремния, легированные германием (CZ-Si<Ge>).

IGBT в настоящее время стали основными приборами силовой электроники в области преобразуемых мощностей от долей кВт до десятков мВт, где потребляется основное количество электроэнергии. Внедрение GTO-тиристоров позволило создать мощные преобразователи для тягового привода переменного тока железнодорожного транспорта, разработать эффективные методы управления электрическими машинами переменного тока (напряжение питания, амплитуда, частота, момент и сила тока). Это позволило упростить схемы, снизить массу, объём, значительно снизить потери и, следовательно, снизить стоимость преобразователей. Однако разработчики электрооборудования столкнулись с внезапными непредсказуемыми отказами силовых тиристоров и диодов, происходящими без связи с эксплуатационными режимами, характеризующимися лавинообразным ростом количества носителей заряда, приводящим к пробоям структуры, вплоть до разрушения прибора. Причиной отказов этих элементов оказалось наличие космических частиц [34]. В частности, оценка радиационной обстановки, связанной с атмосферными нейтронами в различных точках мира составляет, в среднем, $6,1 \cdot 10^{-3} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}$ [35, 36]. За расчетное время эксплуатации 60000 часов при полной нагрузке элементы электропривода подвергаются дозе облучения $\geq 2 \cdot 10^4 \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$. А для

мощных ветрогенераторов, работающих на морском шельфе, при работе в течение 20 лет по 24 часа – $3.8 \cdot 10^6 \text{ н.см}^{-2}$. Таким образом, высоковольтные СПП гибридной конструкции оказались более чувствительными к радиации, в том числе к космическим излучениям, приводящим к уменьшению надёжности работы прибора при облучении практически на порядок [37]. Особенно актуально обеспечение радиационной стойкости многослойных структур для специальной (военной и аэрокосмической) техники. По мнению авторов [38, 39], использование тиристоров в бортовых системах энергоснабжения оборудования невозможно по причине низких экономичности и радиационной стойкости многослойных биполярных приборов, вызванных падением напряжения на р-п переходах. С аналогичными проблемами сталкиваются разработчики наземных систем питания, работающих при действии гамма-излучения, в частности, систем энергоснабжения ускорителей [37].

Следовательно, по мере усложнения конструкции и условий эксплуатации (повышение напряженности электрического поля, температуры, снижения топологических размеров), приборы как гражданского, так и военного назначения должны изготавливаться по технологии, предусматривающей радиационную стойкость изделий. Решить проблему устойчивой работы СПП под действием космических частиц представляется возможным за счёт использования радиационно стойкого полупроводникового материала - монокристаллов Si, легированных германием (CZ-Si<Ge>), поскольку технологии производства и использования в приборах широкозонных полупроводниковых материалов, например SiC, GaN, пока что уступают «кремниевым технологиям», в том числе и по экономическим причинам.

Увеличение может занять «линии» поставок

SiGe является перспективным материалом для силовой электроники, который имеет возможность вытеснить традиционный кремний за счёт более удачного сочетания физических свойств изготавливаемых с его использованием приборов [2]:

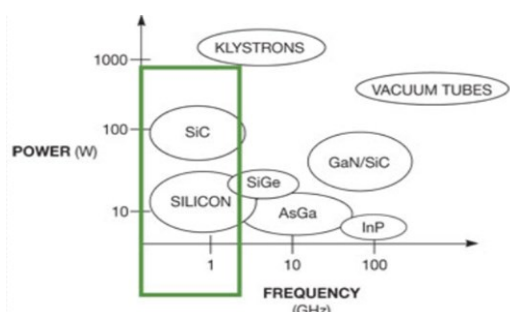


Рис. 2 - Рабочие мощность и частота ИЭТ, изготовленных из разных материалов [40]

Как нами было установлено, при $\Phi_a \leq 10^{10} \text{ см}^{-2}$ скорость генерации А- и Е-центров в кремнии,

легированном Ge, на несколько порядков ниже, чем в контрольных образцах. При $10^{10} \text{ см}^{-2} \leq \Phi_a \leq 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ в CZ-Si<P,Ge> наблюдается активное накопление этих центров со скоростью равной (Е-центры) или большей (А-центры), чем в не легированном германием Si. При $\Phi_a \geq 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ эти дефекты практически не образуются.

Помимо повышения радиационной стойкости, СПП на основе CZ-Si<P,Ge> показали существенно более высокие термостабильность и выход приборов (ПВГ) с высоким обратным пробивным напряжением, по сравнению с обычным кремнием. Была установлена оптимальная концентрация германия $N_{Ge} = (0,6 \dots 1) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, которая при изготовлении силовых тиристоров (Т122, рабочее напряжение до 1200 В, ток 20...25 А) позволяет на 3050 % увеличить выход приборов 11 и 12 классов, а также повысить устойчивость их динамических характеристик в процессе термоциклирования (-60; +125 °С) (табл. 3).

Таблица 3 – Выход годных тиристоров типа Т122, изготовленных по идентичной технологии из CZ-Si и CZ-Si<Ge>

| Шифр | 001 | 014 | 936 | 052 | 963 | 956 |
|------------------------------------------|---------|-----|-----|------|-------|-------|
| $N_{Ge} \cdot 10^{-18}, \text{ см}^{-3}$ | 0 | 0 | 5,6 | 63,2 | 110,5 | 116,5 |
| Объём партии, шт. | 647 | 421 | 249 | 617 | 473 | 452 |
| ПВГ после термоцикл. -60; +125, % | 10 | 1,5 | 7,5 | 0 | 0 | 0 |
| Распределение по классам, % | 10 | 23 | 30 | 3,2 | 6,0 | 0,8 |
| | 11 | 18 | 22 | 22,2 | 13,0 | 8,3 |
| | 12 | 25 | 15 | 66,7 | 77,0 | 79,5 |
| Сумм. ПВГ, % | 11+1 | 43 | 37 | 88,9 | 90 | 87,8 |
| | 2 | | | | | 60,7 |
| | 10+1+12 | 66 | 67 | 92,1 | 96 | 88,6 |

Установлена оптимальная концентрация $N_{Ge} = (0,6 \dots 1) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в монокристаллах CZ-Si<Ge, P> ($N_P \approx 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), использование которой в технологии силовых тиристоров (Т122, рабочее напряжение до 1200 В, ток 20...25 А) позволяет на 30...50 % увеличить выход приборов 11 и 12 классов, а также повысить устойчивость их динамических характеристик в процессе термоциклирования (-60; +125 °С).

К числу ещё одного несомненного преимущества легирования кремния германием следует отнести возможность обеспечения высокой согласованности периода кристаллических решеток подложки и наносимой эпитаксиальной плёнки при получении различных видов гетероструктур для силовой электроники микро- наноэлектроники и солнечной энергетики.

Повышение прочностных характеристик монокристаллов кремния

Нами была исследована возможность [41] релаксации упругих напряжений, возникающих при механической обработке бездислокационных монокристаллов Si, за счет образования временных стоков – радиационных дефектов, вводимых при γ -облучении [42]. Как известно [43], при облучении кремния γ -квантами создаются преимущественно точечные радиационные дефекты, отжиг которых может быть осуществлен при температурах более 60°C [44]. Была установлена концентрация вторичных радиационных дефектов в бездислокационном монокристалле кремния $(1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, когда брак при его механической обработке значительно уменьшается. Облучение γ -квантами производилось на кобальтовой пушке К-100000. Обнаружить положительный эффект удалось при облучении γ -квантами с энергией 0,6...10,0 МэВ, экспозиционной дозой $5 \cdot 10^8...1 \cdot 10^9$ рад. Исследовалась также возможность использования γ -облученных монокристаллов в серийных технологиях СПП. В табл. 4 в качестве примера представлены результаты использования γ -облученных бездислокационных монокристаллов, CZ-Si и FZ-Si марок Б-45 ($N_p \sim 9,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), диаметром 45,5 и 80,5 мм (ТУ 48-4-294-87) в технологическом маршруте силовых тиристорov T122, и информация об использовании монокристаллов перечисленных марок, не подвергавшихся γ -облучению.

Брак при механической обработке монокристаллов оценивался по бою, сколам и трещинам при резке на пластины и их шлифовке. Объем партий - по 20-30 монокристаллов каждой марки. Толщина пластин после резки составляла 300-320 мкм.

Как следует из табл.4, брак при механической обработке γ -облученных монокристаллов кремния заметно уменьшился, выход годных приборов увеличился, что свидетельствует об отсутствии негативного воздействия γ -облучения на различных этапах технологии. Применение монокристаллов, подвергнутых γ -облучению в установленных режимах, представляется чрезвычайно перспективным с точки зрения уменьшения отходов при резке, повышения производительности процессов проволоочной резки пластин уменьшенной толщины (менее 150-200 мкм), полученных методами CZ- и FZ-Si. Представляется целесообразным опробование γ -облучения блоков мультикремния перед резкой на пластины для ФЭП, имеющих весьма высокую хрупкость.

Материал для термокомпенсаторов

Между атомами вещества существуют силы межатомного взаимодействия: деформационного, обусловленного деформациями решетки вблизи примесных атомов, электростатического – между заряженными примесями и дефектами, взаимодействия, обусловленные изменением

электронной структуры близлежащих атомов и дефектов, а также изменением положения уровня Ферми при введении примеси. В настоящее время можно считать твердо установленным, что при изменении температуры и концентрации примесей в кремнии и других полупроводниках происходят фазовые превращения (ФП) в области существования твердых и жидких растворов [45-48].

Таблица 4 - Сравнительный анализ использования γ -облученных монокристаллов кремния в серийной технологии СПП

| Марка монокристалла | Брак при механической обработке, % | Выход годных приборов, % |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| CZ-Si, Б – 45/45,5, γ -обл. | 0,55 | 71,20 |
| CZ-Si, Б – 45/80,5, γ -обл. | 0,92 | 69,42 |
| FZ-Si, Б – 45/45,5, γ -обл. | 1,23 | 75,30 |
| FZ-Si, Б – 45/80,5, γ -обл. (ТУ 48-4-294-87) | 2,02 | 70,22 |
| То же, CZ-Si | 2,80 4,05 | 66 68 |
| То же, FZ-Si | 8,25 12,86 | 66 68 |

ФП, по-видимому, являются причиной существования в кремнии макро- и микрообластей с высоким уровнем напряжений кристаллической решетки, развивающихся в результате незавершенных полиморфных и структурных превращений при достаточно высоких скоростях изменения температуры при выращивании [49]. Воздействовать на протекание ФП и, тем самым, управлять свойствами кремния можно путем специфических термообработок и введением легирующих добавок, действие которых либо сдвигает температурные интервалы ФП, либо полностью их подавляет при нагреве. Роль таких добавок играют вещества, при растворении которых в кремнии повышается прочность межатомных связей, то есть развивающиеся давления в очагах концентрации напряжений не будут столь высокими, чтобы вызвать ФП [50]. Нами осуществлен расчет энергии межатомных связей атомов кремния при введении ряда легирующих элементов (Al, Cu, Fe, Mg, Zr, Hf, Sn, Ge, Mo) с привлечением положений металлохимии комплексного легирования [51]. Установлено, что среди изученных элементов Zr и Hf обеспечивают наибольшую энергию межатомной связи атомов кремния, а наблюдаемый при их введении прирост коэффициента линейного расширения минимален ($\Delta\alpha = 0,4...0,2$).

Обнаруженный феномен фазовых превращений был использован при выборе компонентов

комплексного легирования. Кристаллы Si-B-Mo, Si-B-Hf, Si-B-Sn диметром 40-80 мм, выращенные по методу Чохральского, были опробованы в технологии СПП, где они выполняли функции омического контакта, материала термокомпенсатора, а также элемента корпуса прибора. Проведенные испытания по корпусированию показали, что штамповка корпуса к опорной пластине из нового материала не требует изменений величины ударной нагрузки, используемой для термокомпенсаторов из молибдена или вольфрама. Учитывая идентичность коэффициентов термического расширения приборной кремниевой структуры и материала термокомпенсатора, а также, малую плотность кремния ($2,33 \text{ г/см}^3$) по сравнению с $10,2 \text{ г/см}^3$ для Мо и $19,3 \text{ г/см}^3$ для W можно говорить о перспективах дальнейшего применения разработанного материала.

Выводы

В настоящее время затраты на новые производственные мощности могут достигать весьма значительных сумм, в силу чего возникает вопрос целесообразности дальнейшего финансирования. В течение нескольких последних лет отмечаются повышенные темпы роста инвестиций в разработку альтернативных полупроводниковых материалов, таких как SiC, GaN, GaAs и его твердые растворы, алмаз. Это вызвано возможностью создания на их основе новых высокотемпературных, радиационно стойких СПП, имеющих лучшее быстродействие и частотные характеристики в сравнении с кремниевыми приборами. В основном их использование направлено на разработку новых компактных, энергоэффективных СПП и SMART-модулей (преобразователи для солнечной, ветроэнергетики, сварочных аппаратов, электротранспорта, силовых приводов), для высоковольтной СВЧ-электроники (MOSFET, HBT, JFET, диоды Ганна, p-i-n-диоды для мобильной связи, радиолокации, GPS). Однако уникальность и высокая стоимость таких разработок позволяет их пока что использовать в оборонной и военной технике, а также аппаратах, работающих в чрезвычайных условиях космического пространства (температура $\sim 500^\circ\text{C}$, агрессивная среда, перегрузки, высокое давление). В то же время производители не готовы полностью отказаться от кремния, поскольку освоение нового материала занимает порядка десяти лет и требует больших финансовых вложений. Кремний является самым изученным и доступным полупроводниковым материалом, и возможности его использования далеко не исчерпаны. Это и сверхчистые высокосовершенные монокристаллы кремния, в том числе НТЛ-кремний, и кремниевые пластины диаметром до 450-675 мм с программируемыми свойствами, и специально легированные монокристаллы. Проблемами электронных устройств ближайшего будущего станут теплоотвод и снижение

энергопотребления. Способами решения этих проблем могут явиться как схемотехнические решения так и использование моноизотопного кремния, теплопроводность которого значительно выше, чем у обычного кремния, состоящего из трёх устойчивых изотопов. И после 2030-х гг., когда прогнозируется закат кремниевой эры, кремниевые технологии всё ещё будут сохранять свои позиции в силовой и информационной электронике, солнечной энергетике. Качественный скачок при переходе на новый вид элементной базы — графеновой, фотонной, спинтронной или др. Однако, даже если новые материалы существенно превзойдут по своим характеристикам кремний, новые подходы к приборным технологиям унаследует передовые достижения кремниевой электроники.

Список литературы

1. Камински, Н. Воздействие космического излучения на интенсивность отказов IGBT / Н. Камински, Т. Стясни // *Силовая электроника*. – 2008. – №1. – С.30-32.
2. Busatto, G. Cosmic Rays induced Single Event Effects in Power Semiconductor Devices / G. Busatto // *Naples*. – 2006. URL: http://g.eng.cam.ac.uk/robuspig/pub_present/ISPSD06/02_Busatto.pdf
3. Войтович, В. Si, CaAs, SiC, CaN – Силовая электроника. Сравнение, новые возможности / В. Войтович, А. Гордеев, А. Думаневич // *Силовая электроника*. – 2010. – №5. – С. 4-10.
4. Енишерлова, К. Л. Кремниевые структуры для силовой электроники / К. Л. Енишерлова, М. М. Крымко // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2001. – №9. – С. 845-851.
5. Сурайкин, А. И. Быстродействующие высоковольтные GaAs диоды для силовой электроники / А. И. Сурайкин. URL: <http://cyberleninka.ru/.../bystrodeystvuyuschie-vysokovoltnye-gaas-diody-dlya-silov> – 2014.
6. Бунтов, Е. Гетероструктуры на основе нитрида галлия (GaN) и технологии компании OMMIC на их основе / Е. Бунтов. URL: www.npk-photonica.ru/images/statya-svch-pdf102540.pdf.
7. Абдулаев, О. Р. Разработка технологии создания эпитаксиальных структур нитрида галлия на кремнии для мощных СВЧ p-i-n диодов / О. Р. Абдулаев, М. В. Меженны, М. Ю. Филатов // «Кремний-2014». Тезисы докладов. Иркутск, 7-12.07.- 2014. – С. 152.
8. Балакирев, А. Перспективы нитрида галлия в СВЧ-электронике. Решения компании RFHIC // А. Балакирев, А. Туркин // *Электроника. Наука. Технология. Бизнес*. – 2015. – №4. – С. 4-69.
9. Rahimo, M. Power Semiconductors for Power Electronics Applications ABB Switzerland Ltd, Semiconductors / M. Rahimo // *CAS-PSI Special course Power Converters, Baden Switzerland*. – 8th May 2014. – slides 43, 46.
10. Fujitsu. URL: http://www.fujitsu.com/emea/news/pr/fseu-en_20130717-1061-fujitsu-gan-power-devices-150v.html.
11. Войер, П. Прорыв в технологиях широкозонных материалов предвещает начало масштабного внедрения SiC / П. Войер // *Новости электроники*. – 2017. – № 11. URL: <https://www.compel.ru/lib/ne/2017/11/6>.
12. URL: <https://hi-news.ru/technology/elektronika-kotorayasmozhet-rabotat-na-venere-kak-ee-sozdat.html>.

13. URL: https://ko.com.ua/stoimost_moshhnoj_elektroniki_na_osnove_sic_snizitsya_v_3_i_bolee_raz_121574.
14. **Хмельницкий, Р. А.** Синтетический алмаз для электроники и оптики / **Р. А. Хмельницкий, Н. Х. Талипов, Г. Е. Чучева.** – Москва: Издательство ИКАР. – 2017. – 228 с.
15. Алмазная реанимация закона Мура. URL: <https://habr.com/post/285984/>.
16. **Груздов, В. В.** Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике / **В. В. Груздов, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой.** – Москва: Техносфера, 2016. – 328 с.
17. **Войтович В.** Идеи 60-х как материальная возможность перестроить мировую электронику XXI века / **В. Войтович, А. Гордеев** // *Современная электроника.* – 2013. - № 3. - С. 10-16.
18. **Бондарь, Д.** Нитрид галлия – премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники / **Д. Бондарь** // *Компоненты и технологии.* – 2018. - №4. – С. 134-137.
19. **Бондарь, Д.** Полупроводниковая микроэлектроника – 2017 г. Ч. 3. Новые материалы посткремниевой эпохи – уже настоящее, а не будущее / **Д. Бондарь** // *Электронные компоненты.* – 2018. – № 1. URL: <http://www.syntezmicro.ru/download/publikatsii>.
20. **Бондарь, В.** Мировая рокировка военной и гражданской микроэлектроники. Везде, кроме России / **В. Бондарь** // *Электронные компоненты.* – 2018. – № 4. URL: <http://www.syntezmicro.ru/download/publikatsii>
21. iXBT Новости. URL: www.ixbt.com.
22. Electronic engineering times. URL: www.eetimes.com.
23. **Рейви, К.** Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / **К. Рейви.** – Москва : Мир, 1984. – 475 с.
24. **Александров, Л. Н.** Переходные области эпитаксиальных полупроводниковых пленок / **Л. Н. Александров.** – Новосибирск: Наука, 1978. – 270 с.
25. **Бахрушин, В. Е.** Роль фоновых примесей подложки в формировании переходной области слаболегированных эпитаксиальных слоев кремния / **В. Е. Бахрушин** // *Неорганические материалы.* – 1996. - Т.32. – №6. - С. 650-652.
26. **Бахрушин, В. Е.** Образование прослоек дырочного типа в кремниевых эпитаксиальных p-n⁺ структурах / **В. Е. Бахрушин, П. Н. Галкин и др.** // *Эл. техника. Сер. Полупроводниковые приборы.* – 1991. – №1. – С. 10-14.
27. **Критская Т. В.** Современные тенденции получения кремния для устройств электроники: Монография / **Т. В. Критская.** - Запорожье: Изд-во: ЗГИА, 2013. – 353 с.
28. Пат. 0002202656 Россия МКИ⁷ С30В 15/04 Способ получения кремния, легированного сурьмой / Губенко А. Я. (Россия). – № 2001115968. Заявл. 15.06.01. Опубл. 320.04.03. Бюл. № 14.
29. Ядерно-легированный кремний для силовой электроники. URL: <https://habr.com/post/388867/>.
30. **Johnson, N. M.** Hydrogen passivation of oxygen-related thermal-donor defect in silicon / **N. M. Johnson, S. K. Hahn** // *Appl. Phys. Lett.* - 1986. - v.48. – №11. - P. 709-711.
31. **Claubourn, M.** Activation energy for thermal donors in silicon / **M. Claubourn, R. C. Newan** // *Appl. Phys. Lett.* - 1987. - v. 51. – № 26. - P. 2197-2199.
32. **Шаховцов, В. И.** Некоторые проблемы радиационной физики твердого тела / **Шаховцов В. И., Ясковец И. И.** // *УФ.* - 1979. - Т. 24. - № 2. – С. 193-203.
33. **Критская, Т. В.** Особенности спектров ИК-поглощения термодоноров в кристаллах Si:Ge / **Т. В. Критская, Л. И. Хируненко, В. И. Шаховцов, В. И. Яшник** // *ФТП* – 1990. – Т.24. – Вип. 6. - С. 1129-1132.
34. Feature and Application of Gate Turn-off Thyristors. Mitsubishi Highpower Semiconductors. URL: <http://www.mitsubishichips.com/Global/files/manuals/gtotthyristors.pdf>.
35. **Владимиров, В. М.** Планетарное распределение вторичных нейтронов / **В. М. Владимиров, Л. В. Границкий, Н. Н. Гурова, А. В. Салагаева, Р. Г. Хлебопрос.** Сайт «Современные проблемы». URL: <http://modernproblems.org.ru/ecology/14-hlebopros3.html>.
36. **Быткин, С. В.** Конкурентная разведка конъюнктурно-технологических перспектив традиционного и high-tech экспорта Украины: Монография / **С. В. Быткин.** – Запор. Держ. Инж. Акад. - Запоріжжя:ЗДІА, 2017. - 280 с.
37. **Bruemmer, J. E.** Schmitz Efficient Design in a DC to DC Converter Unit. NASA Technical Memorandum / **J. E. Bruemmer, F. R. Williams G. V.** E-13499 prepared for the 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington, DC, July 28–August 2, 2002. URL: <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2002/TM-2002-211804.pdf>.
38. **Keller J.** Power electronics designers look to the future / **J. Keller** // *Military & Aerospace Electronics.* – 2002. URL: http://mae.pennnet.com/articles/article_display.cfm?Section=ARCHI&C=Feat&ARTICLE_ID=161973&KEYWORDS=Schottky%20QPL&p=32.
39. **Rausch, R.** Electronic Components & Systems and their Radiation Qualification for Use in the LHC Machine. European Laboratory For Particle Physics, Cern-SI Divisioncern SI 99-004 (Co) / **R. Rausch** // *Invited Paper presented at LHC Electronic Board Workshop Snowmass, Colorado, USA, 20-25 September 1999.* URL: http://project.slac.stanford.edu/lc/local/Radphysics/European_Lab.pdf.
40. **Taranovich, S.** Si vs. GaN vs. SiC: Which process and supplier are best for my power design? / **S. Taranovich** // Сайт EDN. – 2013. URL: <http://www.edn.com/design/power-management/4409627/3/Si-vs--GaN-vs--SiC--Which-process-and-supplier-are-best-for-my-power-design>.
41. А.с. 1603860 СССР, МКИ³ С 30 В 31/20, 29/06. Способ обработки монокристаллов кремния / Критская Т. В., Неймарк К.Н., Нечипоренко Ю.Л., Трубицын Ю.В., Червонный И.Ф., Кустов В.Е., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л., Бидуха В.И., Думбров В.И., Фалькевич М. Э., Ахтман Л. К. (СССР). – № 4484438/23 – 26; заявлено 19.09.88.
42. **Критская, Т. В.** Воздействие γ -облучения на кварцевые тигли / **Т. В. Критская, К. Н. Неймарк, Б. Л. Шкляр** // *Цветные металлы.* – 1993. – № 2. – С. 49-50.
43. **Шаховцов, В. И.** Некоторые проблемы радиационной физики твердого тела / **В. И. Шаховцов, И. И. Ясковец** // *УФЖ.* -1979. - Т. 24. – № 2. - С. 193-203.
44. **Hirashi, H.** The dissolution rate of silica in molten silicon / **H. Hirashi, K. Hoshikawa** // *Jap. J. Appl. Phys.* - 1980. - V. 19, № 8 - P. 1573-1574.
45. **Регель, А. .** Закономерности формирования структуры электронных расплавов / **А. Р. Регель, В. М. Глазов.** – Москва: Наука, 1982. – 294 с.
46. **Полтавцев, Ю. Г.** Структура полупроводниковых расплавов / **Ю. Г. Полтавцев.** – Москва: Металлургия, 1984. – 264 с.

47. Губенко, А. Я. Фазовые превращения в твердом и жидком кремнии / А. Я. Губенко // *Кристаллография*, 2001. - Т. 46. - № 1. - С. 88-94.
48. Таран, Ю. М. Структурные изменения при нагреве монокристаллов кремния / Ю. М. Таран, В. М. Глазов, А. Р. Регель и др. // *ФТП*. -1991. -Т.25. – Вып. 4.- С.588-595.
49. Глазов, В. М. Подход к обоснованию возможности повышения термостабильности кремния путем его легирования / В. М. Глазов // *Изв. Вузов. Цветная металлургия*. - 1997. -№ 6. - С. 67-71.
50. Таран, Ю. Н. Влияние легирования на структуру и свойства полупроводникового кремния / Ю. Н. Таран, В. З. Куцова, Т. В. Критская и др. // *Изв. Вузов. Материалы электронной техники*. - 2003. - 1. - С. 26-29.
51. Приходько, Э. В. Металлохимия комплексного легирования / Э. В. Приходько. – Москва: Металлургия, 1983. – 184 с.
14. Hmelnickij, R. A., Talipov, N. H. Chucheva, G. E. Sinteticheskijalmaz dlya elektroniki i optiki. Moskwa, 2017, 228.
15. Almaznaya reanimaciya zakona Mura. Available at: <https://habr.com/post/285984/>.
16. Gruzdov, V. V., Kolkovskij, Yu. V., Koncevoj, Yu. A. Kontrol novyh tehnologij v tverdotelnoj SVCh elektronike [Control of new technologies in solid-state microwave electronics]. Moskva, 2016, 328.
17. Vojtovich, V. Gordeev, A. Idei 60-h kak materialnaya vozmozhnost perestroit mirovuyu elektroniku XXI veka. *Sovremennaya elektronika*, 2013, 3, 10-16.
18. Bondar, D. Nitrid galliya – premer sredi novyh materialov poluprovodnikovoj mikroelektroniki. *Komponenty i tehnologii*, 2018, 4, 134-137.
19. Bodnar, D. Poluprovodnikovaya mikroelektronika – 2017. 3. Novye materialy postkremnievoj epohi – uzhe nastoyashee, a ne budushee. *Elektronnye komponenty*. 2018, 1. Available at: <http://www.syntezmicro.ru/download/publikatsii>.
20. Bondar, V. Mirovaya rokirovka voennoj i grazhdanskoj mikroelektroniki. Vезде, krome Rossii. *Elektronnye komponenty*, 2018, 4. Available at: <http://www.syntezmicro.ru/download/publikatsiihttp>
21. iXBT Novosti. Available at: www.ixbt.com.
22. Electronic engineering times. Available at: www.eetimes.com.
23. Rejvi, K. Defekty i primesi v poluprovodnikovom kremnii. Moskwa: Mir, 1984, 475.
24. Aleksandrov, L. N. Perehodnye oblasti epitaksialnyh poluprovodnikovyh plenok. Novosibirsk: Nauka, 1978, 270.
25. Bahrushin, V. E. Rol fonovyh primesej podlozhki v formirovanii perehodnoj oblasti slabolegirovannyh epitaksialnyh sloev kremniya. *Neorganicheskie materialy*, 1996, 32, 6, 650-652.
26. Bahrushin, V. E., Galkin, P. N. i dr. Obrazovanie prosloek dyrochnogo tipa v kremnievyh epitaksialnyh n-n+ strukturah. *El. tehnika. Ser. Poluprovodnikovye pribory*, 1991, 1, 10-14.
27. Kritskaya, T. V. Sovremennye tendencii polucheniya kremniya dlya ustrojstv elektroniki: Monografiya Zaporozhje, 2013, 353.
28. Gubenko, A. Ya. Pat. 0002202656 Rossiya MKI7 S30V 15/04 Sposob polucheniya kremniya, legirovannogo surmoj. № 2001115968. Zayavl. 15.06.01. Opubl. 320.04.03. Byul. 14
29. Yaderno legirovannyj kremnij dlya silovoj elektroniki. Available at: <https://habr.com/post/388867/>.
30. Johnson, N. M., Hahn, S. K. Hydrogen passivation of oxygen-related thermal-donor defect in silicon. *Appl Phys. Lett.*, 1986, 48, 11, 709-711.
31. Claubourn, M., Newan, R.C. Activation energy for thermal donors in silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51, 26, 2197-2199.
32. Shahovcov, V. I., Yaskovec, I. I. Nekotorye problemy radiacionnoj fiziki tverdogo tela [Some problems of solid-state radiation physics] . *UF*. 1979, 24, 2, 193 – 203.
33. Kritskaya, T. V. Osobennosti spektrov IK-pogosheniya termodonorov v kristallah Si:Ge. *FTP*, 1990, 24, 6, 1129-1132.
34. Feature and Application of Gate Turn-off Thyristors. Mitsubishi Highpower Semiconductors. Available at: <http://www.mitsubishichips.com/Global/files/manuals/gtothyristors.pdf>.
35. Vladimirov, V. M., Granickij, L. V., Salagaeva, A. V., Hlebopros, R. G. Planetarnoe raspredelenie vtorichnyh

Bibliography (transliterated)

1. Kaminski, N., Styasni, T. Vozdejstvie kosmicheskogo izlucheniya na intensivnost otkazov IGBT [The impact of cosmic radiation on the intensity of IGBT failures]. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2008, 1, 30-32.
2. Busatto, G. Cosmic Rays induced Single Event Effects in Power Semiconductor Devices. *Naples*, June, 4th 2006. Available at: http://g.eng.cam.ac.uk/robuspip/pub_present/ISPSD06/02_Busatto.pdf.
3. Vojtovich, V. A. Gordeev, A., Dumanovich, A. Si, SaAs, SiS, SaN – Cilovaya elektronika. Cravnenie, novye vozmozhnosti. *Silovaya elektronika*, 2010, 5, 4-10.
4. Enisherlova, K. L., Krymko, M. M. Kremnievy struktury dlya silovoj elektroniki. *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya*, 2001, 9, 845-851.
5. Surajkin, A. I. Bystrodejstvuyushie vysokovoltnye GaAs diody dlya silovoj elektroniki. 2014. Available at: <http://cyberleninka.ru/.../bystrodejstvuyushie-vysokovoltnye-gaas-diody-dlya-silov>.
6. Buntov, E. Geterostruktury na osnove nitrida galliya (GaN) i tehnologii kompanii OMMIC na ih osnove. Available at: www.npk-photonica.ru/images/statya-svch-pdf102540.pdf.
7. Abdulaev, O. R., Mezheny, M. V., Filatov, M. Yu. Razrabotka tehnologii sozdaniya epitaksialnyh struktur nitrida galliya na kremnii dlya moshnyh SVCh p-i-n diodov. «*Kremnij-2014*». Tezisy dokladov. Irkutsk, 7-12.07. 2014, 152.
8. Balaekirev, A., Turkin, A. Perspektivy nitrida galliya v SVCh-elektronike. Resheniya kompanii RFHIC. *Elektronika. Nauka. Tehnologiya Biznes*, 2015, 4, 4-69.
9. Rahimo, M. Power Semiconductors for Power Electronics Applications ABB Switzerland Ltd, Semiconductors . *CAS-PSI Special course Power Converters*, Baden Switzerland, 8th May 2014, slides 43, 46.
10. Fujitsu. Available at: http://www.fujitsu.com/emea/news/pr/fseu-en_20130717-1061-fujitsu-gan-power-devices-150v.html
11. Vojer, P. Proryv v tehnologiyah shirokozonnnyh materialov predveshaet nachalo masshtabnogo vnedreniya SiC. *Novosti elektroniki*, 2017, 11. Available at: <https://www.compel.ru/lib/ne/2017/11/6>.
12. Available at: <https://hi-news.ru/technology/elektronika-kotoraya-smozhet-rabotat-na-venere-kak-ee-sozdat.html>.
13. Available at: https://ko.com.ua/stoimost-moshhnoj-elektroniki-na-osnove-sic-snizitsya-v_3_i-bolee-raz_121574.

- nejtronov. «Sovremennye problemy». Available at: <http://modernproblems.org.ru/ecology/14-hlebospos3.html>.
36. **Bytkin, S. V.** Konkutentnaya razvedka konyunktorno-tehnologicheskikh perspektiv traditsionnogo i high-tech eksporta Ukrainy: Monografiya Zapor. Derzh. Inzh. Akad. Zaporizhzhya: ZDIA, 2017, 280.
37. **Bruemmer, J. E., Williams, F. R.** Schmitz Efficient Design in a DC to DC Converter Unit. NASA Technical Memorandum. G.V.E-13499 prepared for the 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington, DC, July 28–August 2, 2002. Available at: <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2002/TM-2002-211804.pdf>.
38. **Keller, J.** Power electronics designers look to the future. Military & Aerospace Electronics November, 2002. Available at: http://mae.pennnet.com/articles/article_display.cfm?Section=ARCHI&C=Feat&ARTICLE_ID=161973&KEYWORDS=Schottky%20QPL&p=32.
39. **Rausch, R.** Electronic Components & Systems and their Radiation Qualification for Use in the LHC Machine. European Laboratory For Particle Physics, Cern-SI Division Cern SI 99-004 (Co). *Invited Paper presented at LHC Electronic Board Workshop Snowmass*, Colorado, USA, 20-25 September 1999. Available at: http://project.slac.stanford.edu/lc/local/Radphysics/European_Lab.pdf.
40. **Taranovich, S.** Si vs. GaN vs. SiC: Which process and supplier are best for my power design? *EDN*, 2013. Available at: <http://www.edn.com/design/power-management/4409627/3/Si-vs-GaN-vs-SiC-Which-process-and-supplier-are-best-for-my-power-design>.
41. **Kritskaya, T. V., Nejmark, K. N., Nechiporenko, Yu. L., Trubicyn, Yu. V., Chervonnyj, I. F., Kustov, V. E., Shahovcov, V. I., Shindich V. L., Biduha V. I., Dumbrov, V. I., Falkevich, M. E., Ahtman, L. K. A.s.** 1603860 SSSR, MKI3 S 30 V 31/20, 29/06. Sposob obrabotki monokristallov kremniya / 4484438/23–26; zayavleno 19.09.88.
42. **Kritskaya, T. V., Nejmark, K. N., Shklyar, B. L.** Vozdejstvie g-obluche-niya na kvarcevye tigly. *Cvetnye metally [Black metals]*, 1993, 2, 49-50.
43. **Shahovcov, V. I., Yaskovec, I. I.** Nekotorye problemy radiacionnoj fiziki tverdogo tela. *UFZh*, 1979, 24, 2, 193-203.
44. **Hirashi, H., Hoshikawa, K.** The dissolution rate of silica in molten silicon. *Jap. J. Appl. Phys.*, 1980, 19, 8, 1573-1574.
45. **Regel, A. R., Glazov, V. M.** Zakonomernosti formirovaniya struktury elektronnyh rasplavov. Moskva, 1982, 294.
46. **Poltavcev, Yu. G.** Struktura poluprovodnikovyh rasplavov. Moslwa, 1984, 264.
47. **Gubenko, A. Ya.** Fazovye prevrasheniya v tverdom i zhidkom kremnii. *Kristallografiya*, 2001, 46, 1, 88-94.
48. **Taran, Yu. M., Glazov, V. M.** Strukturnye izmeneniya pri nagreve monokristallov kremniya. *FTP*, 1991, 25, 4, 588-595.
49. **Glazov, V. M.** Podhod k obosnovaniyu vozmozhnosti povysheniya termostabilnosti kremniya putem ego legirovaniya. *Izv. Vuzov. Cvetnaya metallurgiya*, 1997, 6, 67-71.
50. **Taran, Yu. N., Kucova, V. Z., Kritskaya, T. V.** Vliyanie legirovaniya na strukturu i svoystvapoluprovodnikovogo kremniya. *Izv. Vuzov. Materialy elektronnoj tekhniki*, 2003, 1, 26-29.
51. **Prihodko, E. V.** Metallohimiya kompleksnogo legirovaniya. Moskva, 1983, 184.

Сведения об авторах

Критская Татьяна Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой электронных систем, Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина; e-mail: krytskaja2017@gmail.com.

Tatyana Kritskaya – Doctor of Technical Sciences, Professor, , Head of the Department of Electronic Systems, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporozhye, Ukraine; e-mail: krytskaja2017@gmail.com.

Быткін Сергей Витальевич – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела конъюнктурно - технологического системного анализа ПАО «Запорожсталь», г. Запорожье, Украина; e-mail: bytkin@bigmir.net.

Sergey Bytkin – Candidate of Technical Sciences, Associate Prof., Head of the Department of Conjunction and Technology System Analysis of PJSC "Zaporizhstal", Zaporozhye, Ukraine; e-mail: bytkin@bigmir.net.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Критская, Т. В. Перспективные полупроводниковые материалы для использования в силовой электронике / **Т. В. Критская, С. В. Быткін** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 148-161. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.21.

Please cite this article as:

Kritskaya, T. V., Bytkin, S. V. Perspective semiconductor materials for the using in the power electronics. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv:NTU"KhPI", 2018, 26(1302), 1, 148-161, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.21.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Критська, Т. В. Перспективні напівпровідникові матеріали для використання в силовій електроніці / **Т. В. Критська, С. В. Биткін** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 148-161. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.21.

АНОТАЦІЯ Технології високотемпературних і радіаційно стійких силових напівпровідникових приладів (СНП) використовують структури на основі SiC, GaN. Світовий ринок дискретних силових приладів в 2024 р становитиме ~ \$ 23 млрд., Частка приладів на основі кремнію $\cong 87\%$. Запропоновано методи спеціального легування монокристалів CZ-Si і обробки, що підвищує механічні властивості Si, а також радіаційну і термічну стабільність СНП на основі CZ-Si<Ge>. **Ключові слова:** силовий напівпровідниковий прилад; гетероепітаксія; кремній; монокристал; легування; CZ-Si<Ge>; термічна стабільність; радіаційна стійкість

Поступила 27.06.2018